



Institut de recherche
pour le développement

Laboratoire d'Ecologie Végétale

ACFLOW

Un modèle d'analyse des transferts hydriques chez un acacia phréatophyte

OPÉRATION ACACIA

NOTE TECHNIQUE N°3

Arnaud MIGNON, Frédéric DO
(Juin 1999)

SOMMAIRE

1. Objectifs	p. 3
2. Structure	p. 3
3. Transpiration foliaire	p. 4
4. Transfert hydrique dans le tronc	p. 4
5. Mise en jeu des réserves hydriques foliaires	p. 5
6. Extraction racinaire	p. 6
7. Résolution	p. 8
8. Simulation	p. 10
9. Calibrage des paramètres.....	p. 12
9.1. Estimation de la surface foliaire évaporante.....	p. 12
9.2. Calibrage de la réserve	p. 12
9.3. Calibrage des résistances	p. 13
9.4. Circuit électrique complet	p. 14
10. Visualisation des résultats.....	p. 15
Annexe 1 : Conversion des conductances stomatiques	
Détermination d'un profil journalier moyen.....	p. A1
Annexe 2 : Détermination des surfaces conductrices	p. A3
Annexe 3 : Simulations sur le logiciel VENSIM	p. A5
BIBLIOGRAPHIE	p. A8

1. Objectifs

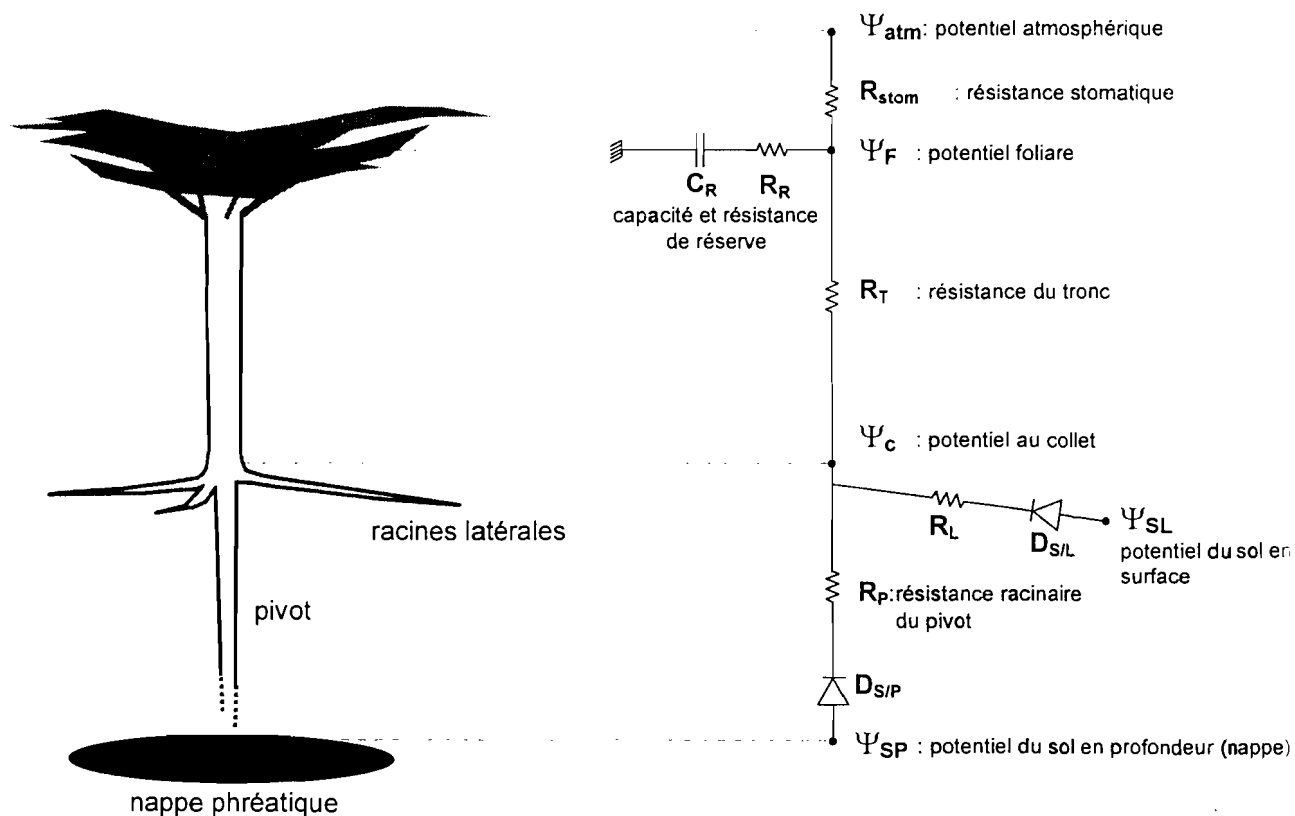
L'objectif concret de cette modélisation est d'aider à l'analyse et à l'interprétation du fonctionnement hydrique d'un peuplement d'acacias de la zone sahélienne. Pour cela, le modèle devra en particulier simuler la double possibilité de prélèvement hydrique de ces arbres phréatophytes : dans les horizons de surface du sol via les racines latérales et dans une nappe profonde via un pivot racinaire. La simulation est envisagée en premier lieu à l'échelle d'un arbre avec un pas de temps horaire sur une période maximale d'une quinzaine de jour.

In fine, l'objectif est de pouvoir analyser les conséquences d'une variation des différents paramètres d'état de ce système sol-arbre-atmosphère comme : les disponibilités en eau du sol, la demande évaporative, la phénologie et la surface foliaire, la conductance stomatique, les résistances hydrauliques internes de l'arbre,... La philosophie de cette modélisation n'est pas de simuler avec la plus grande précision les phénomènes, mais de voir dans quelle mesure un modèle le plus simple possible peut traduire les grandes tendances du fonctionnement hydrique saisonnier des arbres.

Le travail de modélisation se situe à sa première étape, de construction, et ce rapport a pour but de présenter l'état actuel du modèle.

2. Structure

Le modèle ACFLOW est basé sur l'analogie électrique (loi d'Ohm) et simule les flux via les gradients de potentiel hydrique aux bornes des éléments d'un circuit schématisant le système sol-arbre-atmosphère. L'architecture du circuit est représentée ci-dessous :



Le circuit peut être subdivisé en quatre parties qui sont chacune régies par des lois plus spécifiques :

- le couplage atmosphérique (au niveau des feuilles) qui correspond au passage de l'eau en phase gazeuse;
- les transferts en phase liquide dans les tissus conducteurs du bois (xylème);
- la contribution des réserves hydriques foliaires;
- l'extraction de l'eau du sol par le système racinaire constitué deux entités, les racines latérales et le pivot.

3. La transpiration foliaire

La transpiration foliaire constitue le moteur du modèle. Compte tenu de la rugosité du couvert, la conductance aérodynamique est élevée et la transpiration est fortement couplée à l'atmosphère au sens défini par Jarvis et MacNaughton (1986). C'est-à-dire qu'au voisinage des feuilles, les conditions atmosphériques sont très proches de celles rencontrées à l'extérieur du couvert et le flux d'eau évaporé par les feuilles peut être décrit par l'équation simplifiée suivante (Brenner et al., 1991).

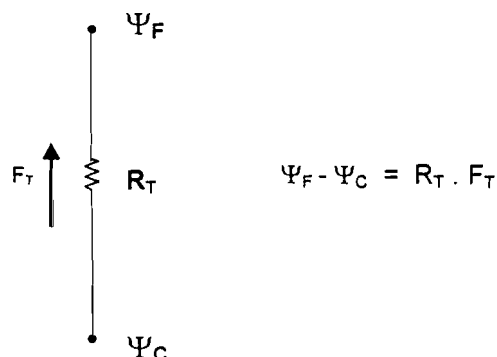
$$F_e = (C_{air} \cdot g_s \cdot D_{sat} \cdot S_{foliaire}) / (\gamma \cdot \lambda_{eau} \cdot \rho_{air}) \cdot (3600/\rho_{eau}) \quad [l/h]$$

- λ_{eau} : chaleur latente de vaporisation de l'eau = $2,5 \cdot 10^6$ J/kg
- C_{air} : capacité calorifique de l'air = 10^3 J/kg/K
- g_s : conductance stomatique [m/s]
- D_{sat} : déficit de pression de vapeur saturante de l'air [Pa]
- $S_{foliaire}$: surface foliaire évaporante [m²]
- γ : constante psychrométrique = 66 Pa/K
- ρ_{air} : densité de l'air à 293K = 1,3 kg/m³
- ρ_{eau} : masse volumique de l'eau à 293K = 10^3 kg/m³

Remarque : Dans cette expression, on peut retrouver une analogie électrique, avec le D_{sat} , qui correspond au potentiel hydrique atmosphérique, et la conductance stomatique à l'inverse d'une résistance. La conductance stomatique est exprimée en m/s. Les profils de g_s qui vont servir de données d'entrée au modèle sont eux exprimés en mmol/m²/s. La conversion d'unité est développée en Annexe 1. Elle fait intervenir la température ambiante ainsi que la pression atmosphérique qui sont effectivement de ce fait des variables de commandes.

4. Transfert hydrique dans le tronc

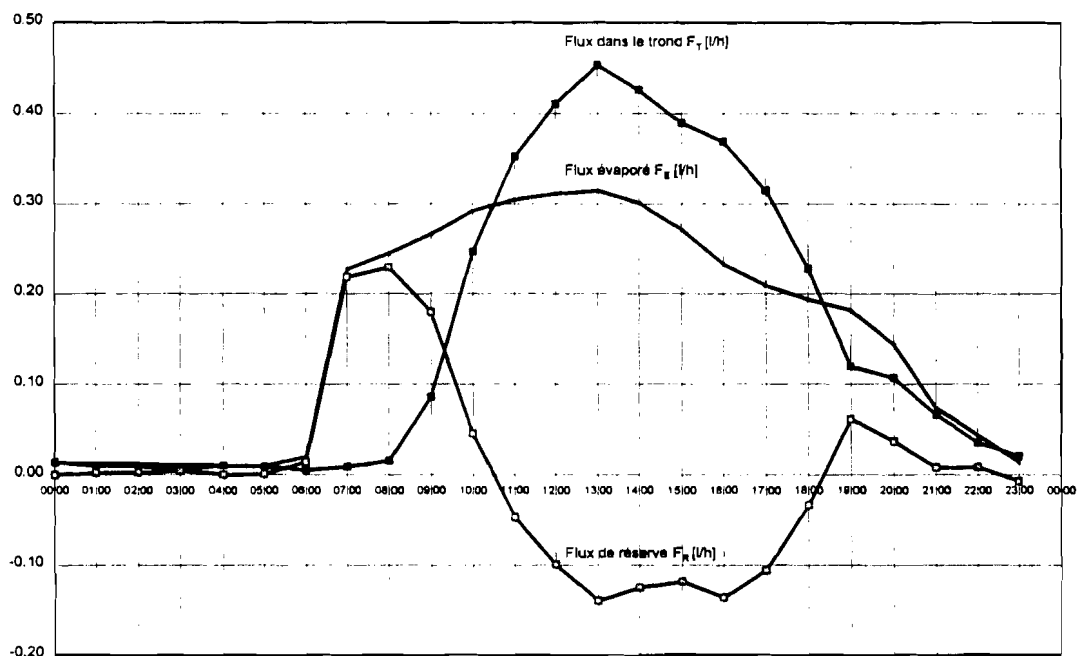
La branche du circuit modélisant le transfert de sève dans le tronc est élémentaire. La différence entre le potentiel au collet et le potentiel moyen au niveau des feuilles est directement proportionnel au flux :



5. Mise en jeu des réserves hydriques foliaires

Pour faire face à la demande évaporative des premières heures du jour, l'arbre fait appel à des réserves d'eau localisées dans sa partie haute. La sève du tronc, qui a plus d'inertie, prend ensuite le relais et reconstitue ces réserves pour le lendemain, dans la mesure où la quantité d'eau disponible dans le sol le permet.

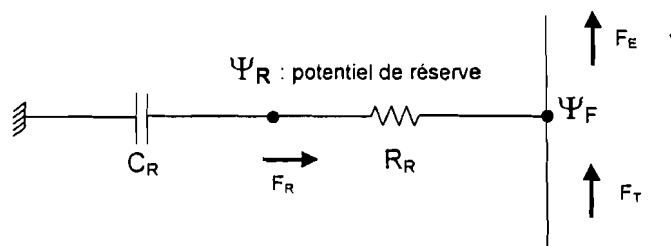
Ainsi, sur un laps de temps court, les réserves hydriques foliaires peuvent alimenter la transpiration, le flux dans le tronc restant nul. Par exemple, pour la journée du 15/07/98 :



Flux évaporé et dans le tronc ; mise en évidence d'un flux de réserve F_R (15/07/98)

Par analogie avec les lois de l'électronique, ce système de charge et de décharge correspond au fonctionnement d'un condensateur qui se déchargerait en début de journée (de 6h00 à 10h30 dans l'exemple ci-dessus) puis se rechargerait au cours de la journée (de 10h30 à 18h30).

La branche du circuit équivalent décrivant ce fonctionnement est la suivante :



La valeur de C_R conditionne le volume maximum que peuvent retenir les réserves. La résistance de charge R_R modélise la facilité du transfert vers l'évaporation. Ensemble, ces deux paramètres déterminent la dynamique d'échange (charge-décharge) entre le tronc et les réserves : la cinétique de transfert suit la constante de temps $\tau = R_R C_R$.

Le courant de réserve F_R est directement fonction de la variation du potentiel Ψ_R :

$$F_R = -C_R \cdot \frac{d\Psi_R}{dt} \quad [1]$$

Le transfert dans la résistance de charge R_R s'écrit :

$$\Psi_R - \Psi_F = R_R \cdot F_R \quad [2]$$

En première approximation, R_R est supposée très peu variable sur le pas de temps. L'équation [2] donne alors :

$$\frac{d\Psi_R}{dt} - \frac{d\Psi_F}{dt} = R_R \cdot \frac{dF_R}{dt} \quad [3]$$

En la conjuguant à l'équation [1] et en tenant compte de la conservation du flux ($F_E = F_T + F_R$), on obtient l'équation différentielle qui régit l'évolution de Ψ_F :

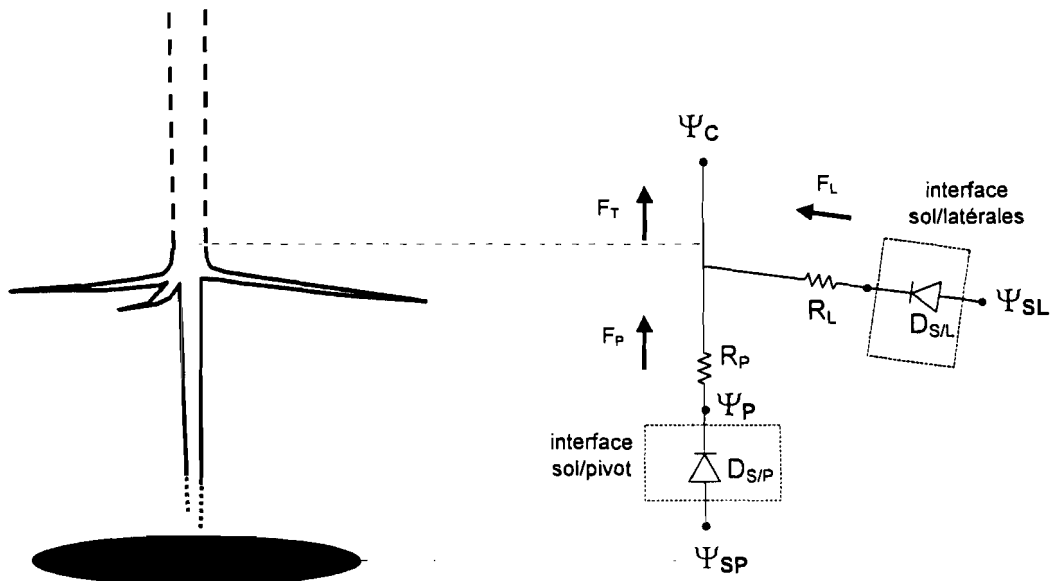
$$\frac{1}{R_R} \frac{d\Psi_F}{dt} + \frac{d(F_E - F_T)}{dt} + \frac{1}{\tau_R} (F_E - F_T) = 0 \quad [4]$$

Avec $\tau_R = R_R C_R$ la constante de temps de charge et de décharge du réservoir (condensateur).

6. Extraction racinaire

Le circuit simule les deux types de racines trouvées chez ces arbres phréatophytes : le pivot central qui peut descendre jusqu'à la nappe phréatique, et le faisceau de racines latérales qui est apte à capter l'eau apportée par les pluies à la surface du sol.

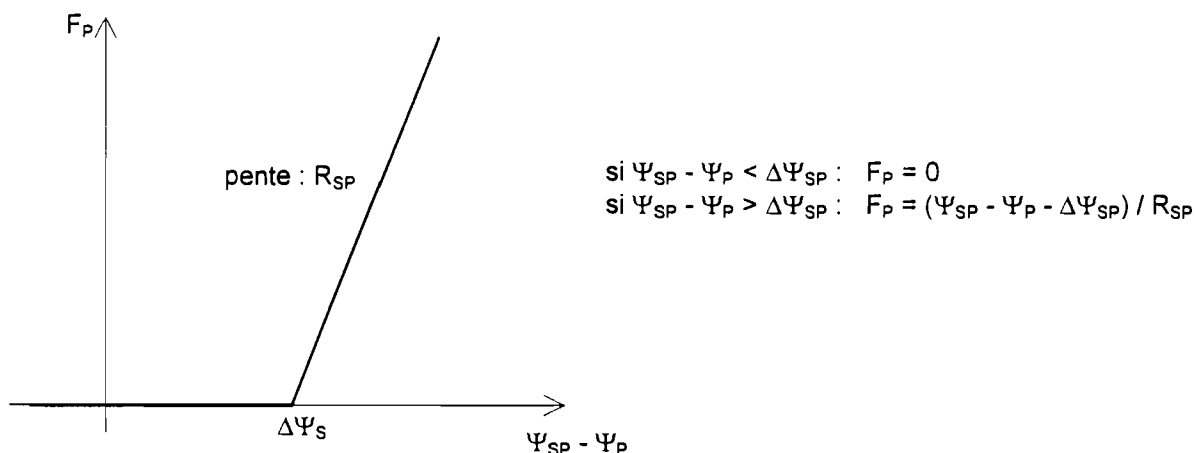
Architecture du circuit équivalent :



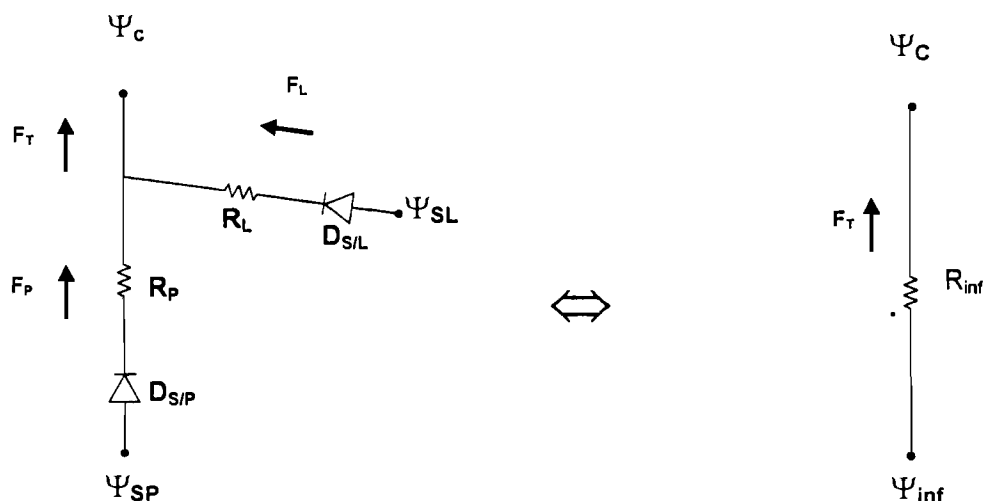
Les potentiels du sol en profondeur (Ψ_{SP}) et en surface (Ψ_{SL}) sont supposés connus et peu variables sur le pas de temps fixé dans l'étude. Il en est de même pour les résistances qui sont *a priori* considérées comme constantes indépendantes.

En ce qui concerne l'interface sol/racine, le flux transféré vers le végétal n'a pas un comportement linéaire en fonction de la différence de potentiel entre la racine et le sol. Par exemple durant la nuit, le potentiel hydrique au collet aligné sur le potentiel foliaire de base qui varie entre -15 et -20 bars en saison sèche devrait engendrer un flux permanent à travers le pivot racinaire en provenance de la nappe alors que le flux reste quasiment nul. L'introduction d'une diode permet de modéliser un seuil $\Delta\Psi_{SP}$ à franchir par $\Psi_{SP} - \Psi_P$ (et $\Delta\Psi_{SL}$ à franchir par $\Psi_{SL} - \Psi_L$) pour autoriser l'absorption. Ce seuil franchi, les lois de transfert sont toujours linéaires.

La caractéristique de transfert de la diode $D_{S/L}$ est analogue à celle de $D_{S/P}$:



A ce stade, il est intéressant de définir un "circuit racinaire équivalent" de façon à simplifier les équations du modèle (celle définissant Ψ_F par exemple) en fonctionnement normal (dans le cas où les deux racines alimentent le tronc):



Les deux diodes étant passantes, les flux racinaires s'écrivent selon la loi d'Ohm :

$$F_P = \frac{-\Psi_C + (\Psi_{SP} - \Delta\Psi_{SP})}{R_P + R_{SP}} \quad F_L = \frac{-\Psi_C + (\Psi_{SL} - \Delta\Psi_{SL})}{R_L + R_{SL}}$$

La conservation du flux au niveau du collet donne en valeur algébrique :

$$F_T = F_P + F_L$$

d'où on déduit le flux dans le tronc F_T en fonction du potentiel au collet Ψ_C :

$$F_T = \frac{-\Psi_C + (\Psi_{SL} - \Delta\Psi_{SL})}{R_L + R_{SL}} + \frac{-\Psi_C + (\Psi_{SP} - \Delta\Psi_{SP})}{R_P + R_{SP}}$$

soit

$$F_T = \frac{-\Psi_C}{R_{nf}} + \frac{\Psi_{nf}}{R_{nf}}$$

avec

$$\frac{1}{R_{nf}} = \frac{1}{R_P + R_{SP}} + \frac{1}{R_L + R_{SL}}$$

et

$$\Psi_{nf} = R_{nf} \cdot \left(\frac{\Psi_{SP} - \Delta\Psi_{SP}}{R_P + R_{SP}} + \frac{\Psi_{SL} - \Delta\Psi_{SL}}{R_L + R_{SL}} \right)$$

Par la suite ce formalisme simplifié sera privilégié dans la description des équations définissant le modèle.

7. Résolution

Dans un premier temps le seuil de chaque diode a été calculé de façon à ce qu'elles basculent simultanément, ce qui n'est vraisemblablement le cas dans la réalité. La première demande évaporative peut être alimentée les réserves et/ou par le tronc (lui-même alimenté par le pivot et/ou les racines latérales).

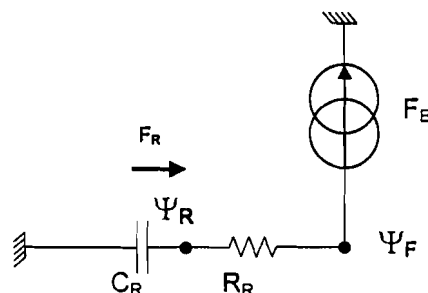
Dans l'exemple de résolution développé ici, ce sont les réserves seules qui interviennent en premier, suppléées ensuite par le pivot et les racines latérales. La demande évaporative est supposée connue.

Les étapes successives de l'évolution des paramètres sont :

- **PHASE 1** : 0h – 6h, il n'y a pas de demande évaporative. les flux sont tous nuls et les potentiels sont alignés sur le potentiel de base Ψ_b
- **PHASE 2** : l'ouverture stomatique commande le début de l'évaporation. Ψ_F commence à diminuer à partir de sa valeur initiale Ψ_b . Cependant, seule la réserve contribue à l'alimentation en eau des feuilles tant que :

$$\begin{cases} \Psi_F > \Psi_{SP} - \Delta\Psi_{SP} \\ \Psi_F > \Psi_{SL} - \Delta\Psi_{SL} \end{cases}$$

Le circuit équivalent se réduit donc à :



Dans ce cas $F_T = 0$, $F_E = F_R$, et l'équation différentielle [4] s'écrit :

$$\frac{d\Psi_f}{dt} = -\frac{F_E}{C_R} - R_R \cdot \frac{dF_E}{dt}$$

l'intégration donne :

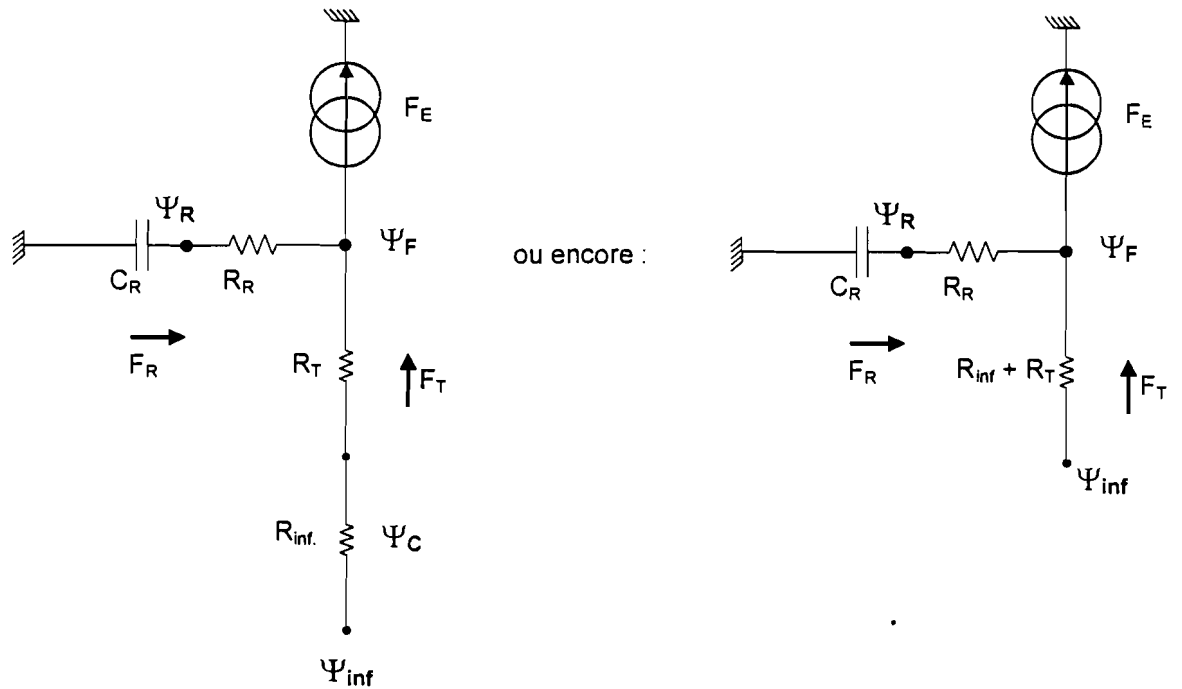
$$\Psi_f = R_R \cdot F_{EM} \cdot \cos(\omega t) - [1 - \sin(\omega t)] \cdot \frac{F_{EM}}{C\omega} + \Psi_{base}$$

On en déduit alors l'expression de Ψ_R par [2]. Ψ_R traduit l'état de la réserve, maximum avant la demande évaporative, puis décroissant pendant les premières heures de la journée en suppléant à l'alimentation par le tronc :

$$\Psi_R = \Psi_F + R_R \cdot F_R$$

- **PHASE 3 :** Très rapidement, les seuils de potentiels sont franchis au niveau du pivot et des racines latérales : Ψ_F atteint le seuil $\Psi_{SP} - \Delta\Psi_{SP}$ le pivot contribue à la transpiration, Ψ_F atteint le seuil $\Psi_{SL} - \Delta\Psi_{SL}$ et ce sont alors les racines latérales qui entrent en jeu.

En utilisant le circuit équivalent des racines (calculé au 6.),
et le circuit électrique équivalent à l'interaction feuille-atmosphère est alors :



Ce deuxième circuit équivalent permet d'obtenir des expressions simplifiées pour le calcul de Ψ_F , Ψ_R , F_R et F_T .

En particulier, on a :

$$F_r = \frac{\Psi_{inf} - \Psi_f}{R_{inf} + R_r} \quad \text{et} \quad \frac{dF_r}{dt} = \frac{-1}{R_{inf} + R_r} \frac{d\Psi_f}{dt}$$

Ces expressions injectées dans l'équation différentielle [4] donnent :

$$\frac{1}{R_r} \frac{d\Psi_f}{dt} + \frac{d}{dt} \left[F_E - \frac{\Psi_{inf} - \Psi_f}{R_r + R_{inf}} \right] + \frac{1}{\tau_r} \left[F_E - \frac{\Psi_{inf} - \Psi_f}{R_r + R_{inf}} \right] = 0$$

d'où :

$$\left(\frac{1}{R_R} + \frac{1}{R_T + R_{inf}} \right) \frac{d\Psi_F}{dt} + \frac{1}{\tau_R(R_T + R_{inf})} \Psi_F = \frac{1}{\tau_R(R_T + R_{inf})} \Psi_w - \frac{F_E}{\tau_R} - \frac{dF_E}{dt}$$

avec $R_{inf}' = R_T + R_{inf}$ et $\tau_T = C_R \cdot (R_R + R_{inf})$ on obtient :

$$\left(\frac{1}{R_R / R_{inf}'} \right) \frac{d\Psi_F}{dt} + \frac{1}{\tau_R R_{inf}'} \Psi_F = \frac{1}{\tau_R R_{inf}'} \Psi_w - \frac{F_E}{\tau_R} - \frac{dF_E}{dt}$$

$$\boxed{\frac{d\Psi_F}{dt} + \frac{1}{\tau_r} \Psi_F = \frac{\Psi_w - R_{inf}'}{\tau_r} - (R_R / R_{inf}') \frac{dF_E}{dt}}$$

S'agissant d'une équation différentielle du premier ordre, la solution générale s'écrit sous la forme : $\Psi_F = A \cdot \cos(\omega t) + B \cdot \sin(\omega t) + C + D \cdot \exp(-t/\tau)$ où A, B et C sont calculés de manière à satisfaire l'équation différentielle, et où D assure la continuité d'une solution unique.

$$\begin{cases} A = R_{inf}' \cdot F_{EM} - F_{EM} \cdot (R_{inf}' - R_{inf}' / R_R) \cdot \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} & (\alpha = \omega \tau) \\ B = F_{EM} \cdot (R_{inf}' - R_{inf}' / R_R) \cdot \frac{\alpha}{1 - \alpha^2} \\ C = \Psi_w \\ D \text{ tel que } \Psi_F \text{ soit continu au moment du basculement} \end{cases}$$

d'où les autres paramètres se déduisent :

$$F_T = (\Psi_{inf} - \Psi_F) / R_{inf}'$$

$$F_R = F_E - F_T$$

$$\Psi_R = \Psi_F + R_R \cdot F_R$$

$$\Psi_C = \Psi_F + R_T \cdot F_T$$

- **PHASE 4** : il n'y a plus demande évaporative. $F_E = 0$, $F_T = F_R$: reconstitution des réserves. Les équations qui régissent les variables Ψ_R et Ψ_F sont les mêmes que lors de la phase 2. Le condensateur se recharge et le potentiel de réserve Ψ_R croît jusqu'à sa valeur d'équilibre Ψ_{Base} .

8. Simulation

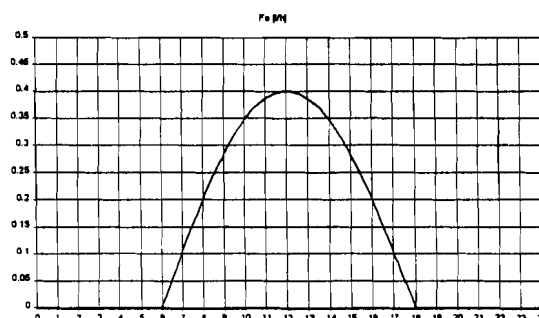
On se donne ici un profil de demande évaporative (loi sinusoïdale), et on suit les variables d'état du modèle résolues au paragraphe précédent :

$$F_E (6h < t < 18) = -F_{EM} \cdot \cos(\omega t)$$

$$F_E (t < 6h ; t > 18h) = 0$$

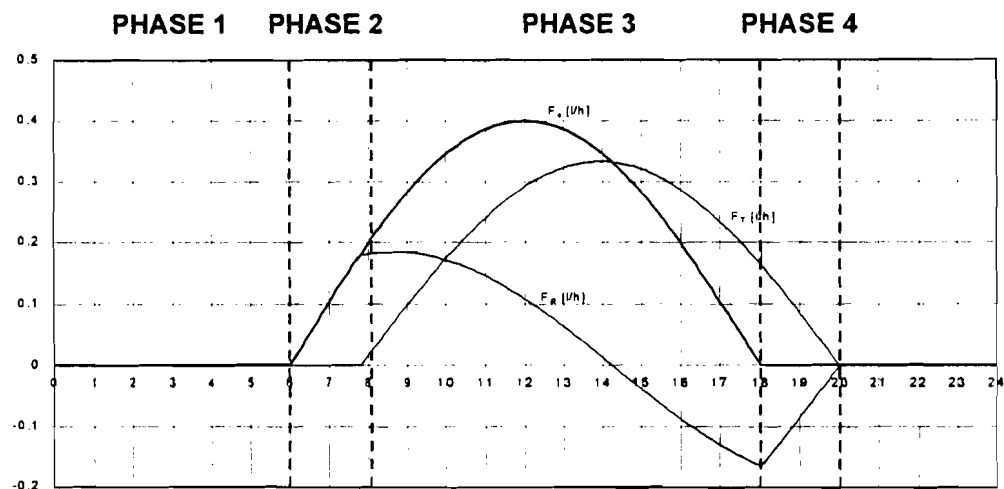
$$\text{avec } \omega = 2\pi/24 \text{ s}^{-1}$$

$$F_{EM} = 0,4 \text{ l/h}$$

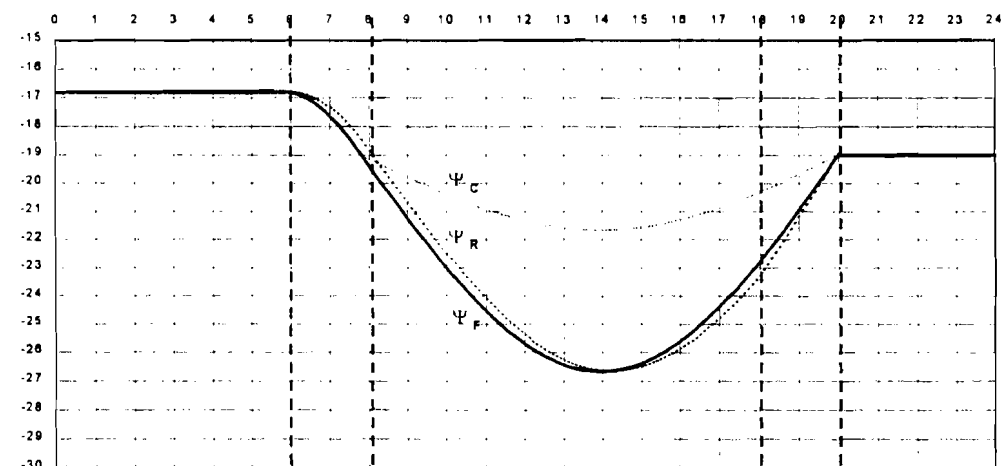


Avec : $R_T = 15 \text{ bar.h/l}$ $R_P = 4 \text{ bar.h/l}$ $R_L = 5 \text{ bar.h/l}$
 $R_R = 3 \text{ bar.h/l}$ $R_{SP} = 10 \text{ bar.h/l}$ $R_{SL} = 12 \text{ bar.h/l}$
 $C_R = 0,1 \text{ l/bar}$ $\Psi_{SP} = -5 \text{ bar}$ $\Psi_{SL} = -19 \text{ bar}$
 $\Delta\Psi_{SP} = 14 \text{ bar}$ $\Delta\Psi_{SL} = 0 \text{ bar}$

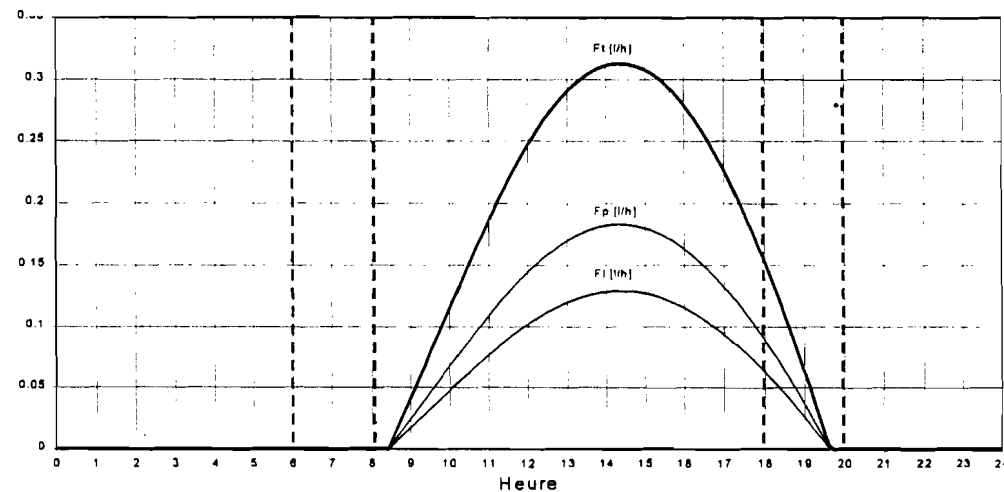
on obtient les profils suivants :



Evolution journalière des flux dans le tronc et la réserve en fonction de la demande évaporative (en l/h)



Evolution journalière des potentiels foliaire, de réserve, et au collet (en bar)



Suivi des flux dans le tronc, le pivot et les racines latérales (en l/h)

9. Calibrage des paramètres

Ce calibrage est réalisé en accord avec les mesures d'une journée donnée (le 15 juillet 1998) au cours de laquelle ont été enregistrés :

- données météorologiques (fréquence horaire)
- potentiel foliaire (7 points de 7h à 21h)
- densité de flux de sève dans le tronc, le pivot, les racines latérales (fréquence horaire)

Ces données concernent trois *Acacias tortilis* témoins. Pour chaque série de données, les calculs prendront en compte la moyenne arithmétique réalisée sur les trois arbres.

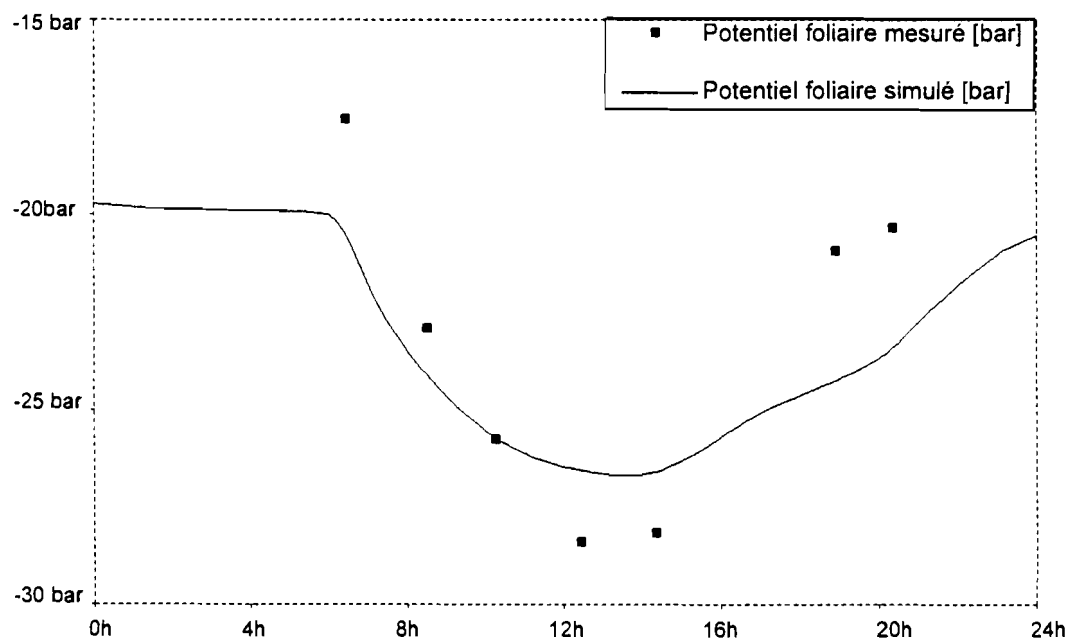
9.1. Estimation de la surface foliaire évaporante

Il faudrait plutôt parler ici de surface moyenne sur la journée, dans la mesure où les feuilles peuvent, selon la demande évaporative et la disponibilité en eau, se refermer sur elles-mêmes et diminuer ainsi la surface évaporante.

Cette surface moyenne est évaluée à partir du cumul journalier du flux dans le tronc F_T , et de la densité de flux évaporé calculée à partir des profils de conductance stomatique et de l'équation du paragraphe 3.

Le 15/07/98 les relevés donnent : $\int F_T = 3,71 \text{ l}$
 $\int f_{\text{évap.}} = 0,88 \text{ l/m}^2$

La surface foliaire est alors estimée à : $S_F = 3,71 / 0,88 = 4,21 \text{ m}^2$,
Ce qui est un ordre de grandeur plausible.

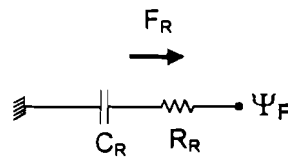


Ecart entre la simulation et la mesure sur le potentiel foliaire

9.2. Calibrage de la réserve

La capacité de la réserve mise en jeu en tout début de journée est estimée par régression linéaire à partir de la connaissance du potentiel foliaire Ψ_F et du flux de réserve $F_R = F_{\text{évap.}} - F_T$.

La branche du circuit représentant cette réserve se réduit à :



F_R suivant l'équation différentielle :

$$\frac{d\Psi_R}{dt} - \frac{d\Psi_F}{dt} = R_R \cdot \frac{dF_R}{dt}$$

L'ajustement de $d\Psi_F/dt$ à dF_R/dt et à F_R calculé sur la décharge (de 6h00 à 10h30) donne :

$$\begin{aligned} R_R &= 3 \text{ bar.h/l} \\ C_R &= 0.1 \text{ l/bar} \end{aligned}$$

En pratique, la valeur de C_R peut être ajustée plus précisément, de façon à obtenir une meilleure corrélation entre les mesures et la simulation. Ainsi, la valeur de C_R prise en compte par la suite sera plutôt 0,06 l/bar.

9.3. Calibrage des résistances

Il est effectué à partir des mesures horaires des densités de flux dans le pivot, les racines latérales, le tronc, et à partir du relevé du potentiel foliaire au cours du 15/07/98. Le passage des densités de flux aux flux réels se fait grâce à la connaissance des surfaces conductrices. Celles-ci sont estimées en Annexe 2.

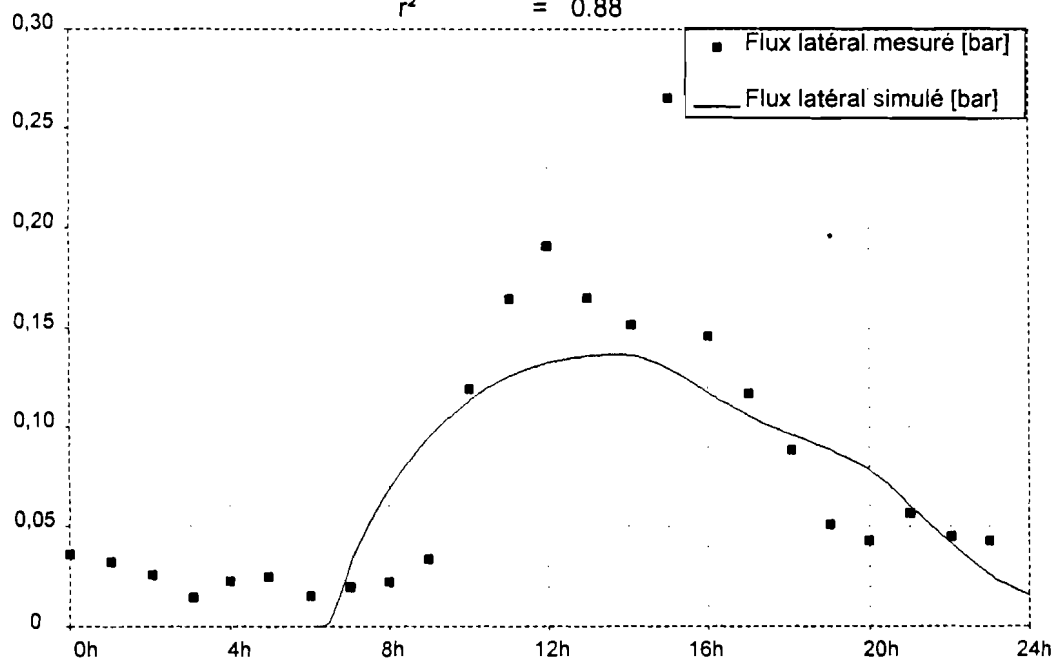
Dans un premier temps, on se sert donc des profils de F_T , F_L et Ψ_F pour évaluer R_T , R_L+R_{SL} et Ψ_{SL} . Puis de celui de F_P pour les paramètres du pivot.

• **ajustement des flux latéraux** : il utilise l'équation électrique de la branche feuille-tronc-racines latérales :

$$\Psi_F = -R_T \cdot F_T - (R_L + R_{SL}) \cdot F_L + (\Psi_{SL} - \Delta\Psi_{SL})$$

La régression linéaire donne :

$$\begin{aligned} R_T &= 15 \text{ bar.l/h} \\ R_{SL} + R_L &= 17 \text{ bar.l/h} \\ \Psi_{SL} - \Delta\Psi_{SL} &= -19 \text{ bar, soit } \Delta\Psi_{SL} = 0 \text{ bar avec } \Psi_{SL} = -19 \text{ bar} \\ r^2 &= 0.88 \end{aligned}$$



Ecart entre la simulation et la mesure sur le flux dans les racines latérales

- **ajustement du flux dans le pivot** : il est réalisé sur la période où le flux mesuré dans le pivot est non nul (diode passante), c'est-à-dire de 8h00 à 20h00.

Connaissant le profil horaire de Ψ_C à partir de F_L ($\Psi_C = \Psi_{SL} - R_L.F_L$), et F_P mesuré :

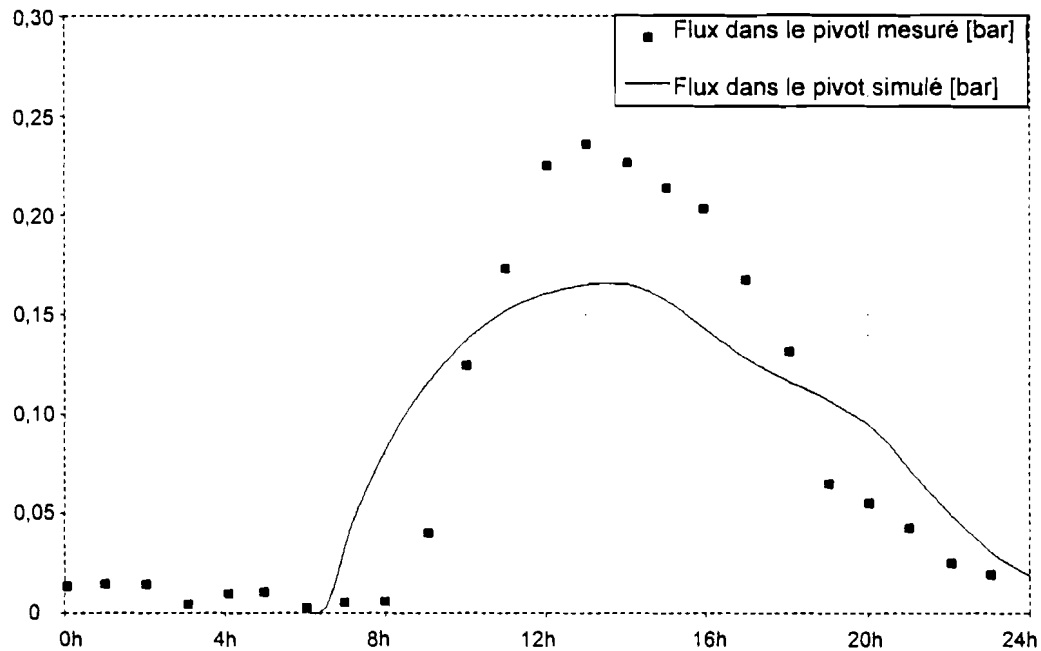
$$\Psi_C = -(R_{SP} + R_P).F_P + (\Psi_{SP} - \Delta\Psi_S)$$

La régression linéaire donne :

$$R_{SP} + R_P = 14 \text{ bar./h}$$

$$\Psi_{SP} - \Delta\Psi_{SP} = -19 \text{ bar, soit } \Delta\Psi_{SP} = 14 \text{ bar avec } \Psi_{SP} = -5 \text{ bar}$$

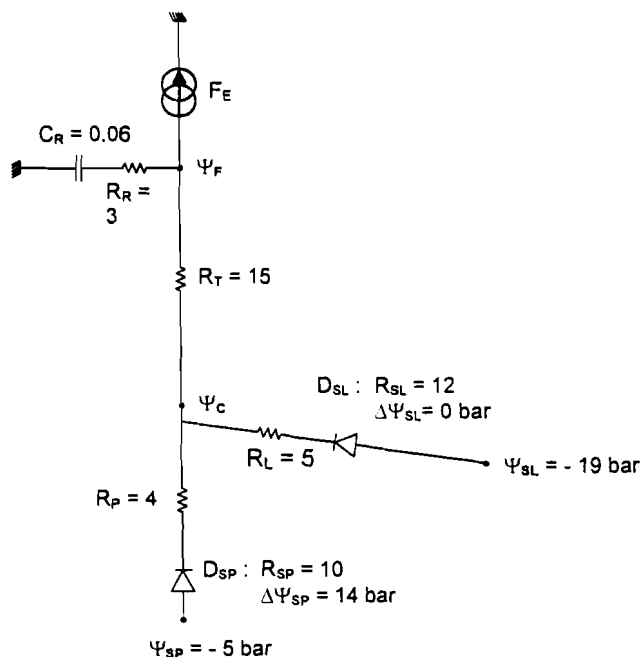
$$r^2 = 0.80$$



Ecart entre la simulation et la mesure sur le flux dans le pivot

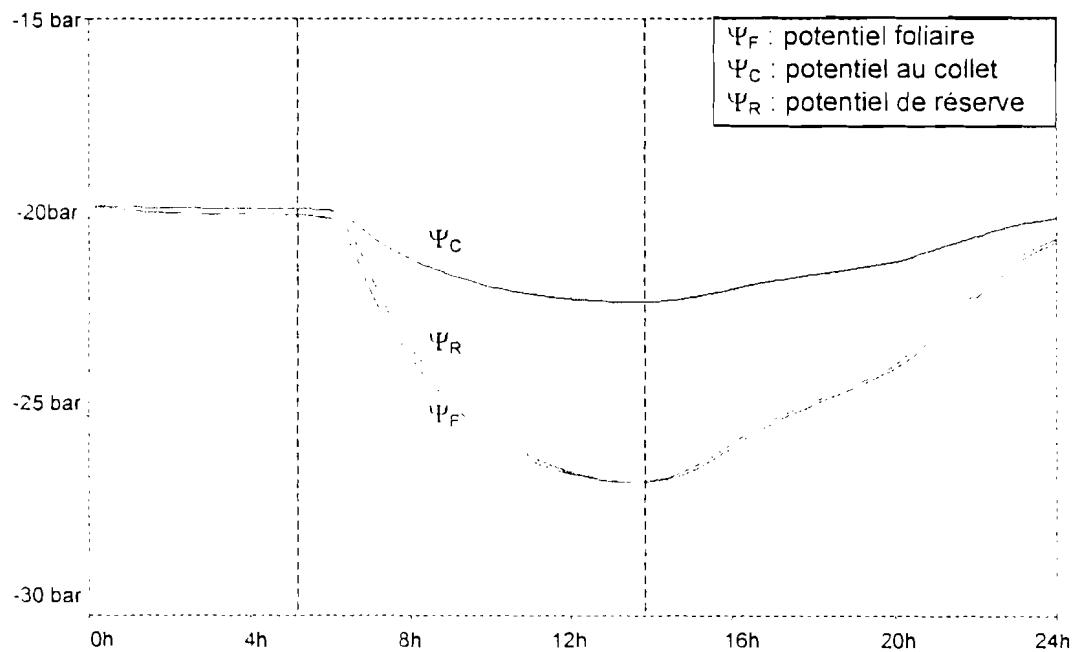
9.4. Circuit électrique complet

Finalement, le circuit équivalent au fonctionnement hydrique de la moyenne des trois arbres pour la journée du 15 juillet 1998 est :

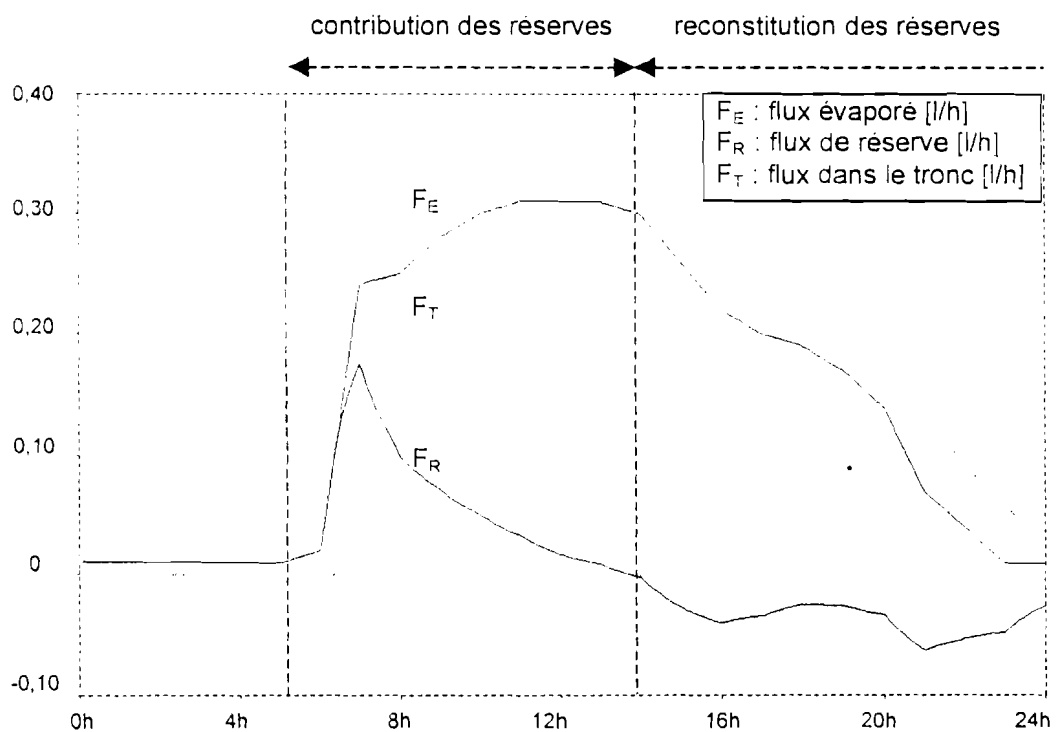


10. Visualisation des résultats

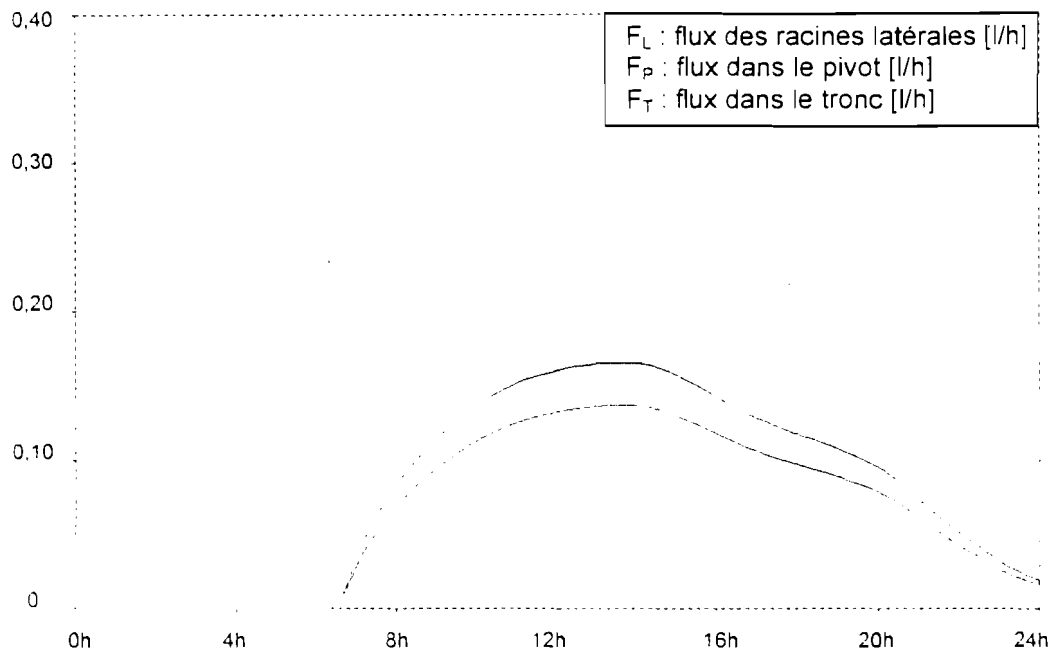
La simulation à l'aide du logiciel PSPICE donne les profils suivants :



Potentiels foliaire, au collet, et de la réserve hydrique foliaire



Réponse des flux dans le tronc et de la réserve hydrique foliaire à la demande évaporative



Contribution des flux racinaires au flux dans le tronc

La linéarité du modèle ne peut pas traduire toute la complexité des transferts de sève dans l'arbre. En particulier en ce qui concerne l'absorption au niveau des racines où la différence de potentiel n'impose pas proportionnellement le flux absorbé. Le seuil $\Delta\psi_s$ qui a été fixé pour la journée du 15/07/98 dépend a priori des caractéristiques du sol.

Le problème de non-linéarité est également soulevé lors de la mise en équation de la contribution des réserves, où le modèle de charge/décharge de condensateur est limité.

En guise de conclusion, il est peut être nécessaire de rappeler que la comparaison des simulations aux mesures de la journée du 15/07/98 ne constitue pas une « validation » au sens des modèles prédictifs. En effet, les paramètres inconnus ont été calibrés par rapport à cette journée, il est donc logique que les résultats soient corrects. Malgré la nature exploratoire du modèle ACFLOW, la prochaine étape du travail représente une certaine forme de validation. Elle va consister à comparer les simulations à des journées de mesures indépendantes du calibrage. Compte tenu de la complexité des phénomènes, on peut s'attendre à des écarts sensibles, mais l'important sera de voir dans quelles mesures les tendances du fonctionnement réel sont rendues ou non.

Annexe 1

Conversion des conductances stomatiques Détermination d'un profil journalier moyen

- L'équation de la transpiration foliaire établie au paragraphe 3. comprend la conductance stomatique G_s exprimée en m/s alors que les mesures effectuées sur le terrain au poromètre sont données en mmol/m²/s.

La conversion s'effectue ainsi :

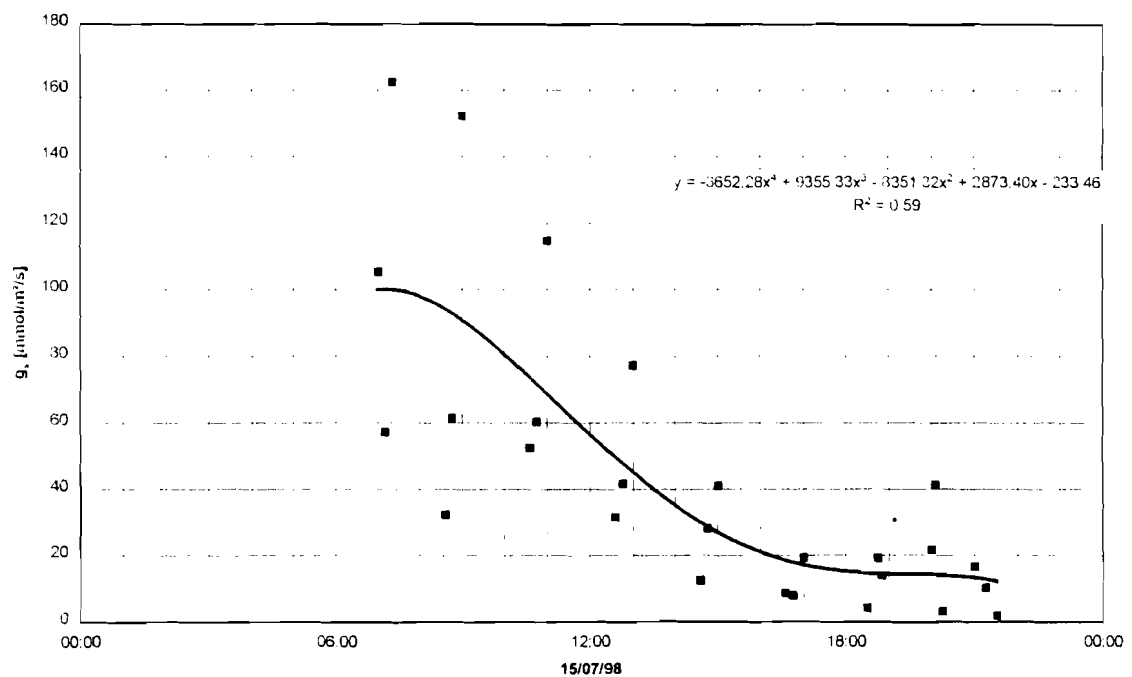
$$\underset{[\text{m/s}]}{G_s} = \underset{[\text{mol/m}^2/\text{s}]}{RT/P} \cdot g_s$$

avec : $R = 8,314 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa/mol}$
 P = pression atmosphérique (en Pa)
 T = température ambiante (en K)

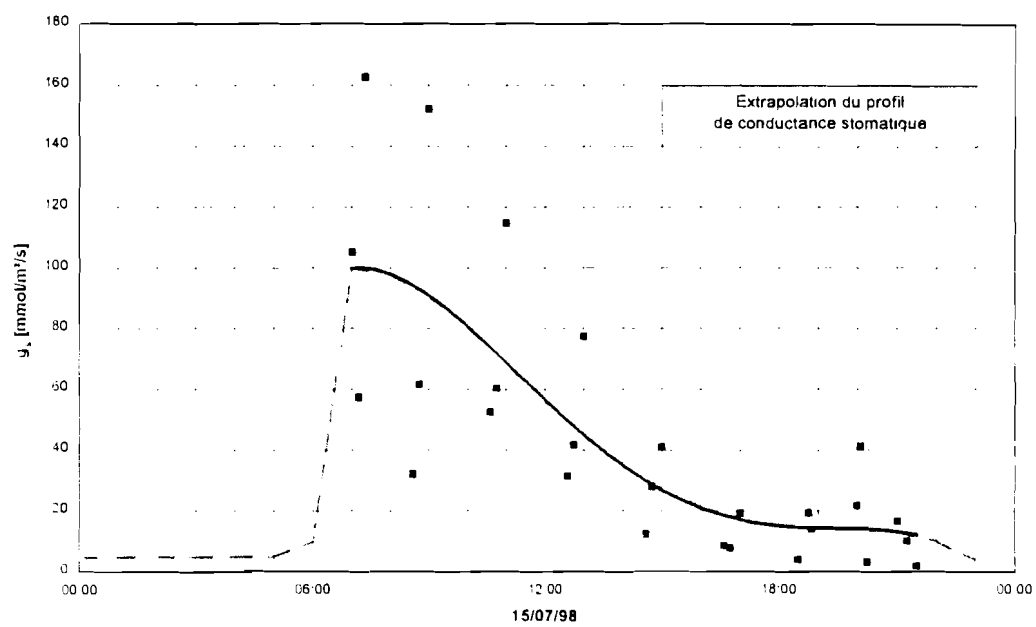
d'où :

$$\underset{[\text{m/s}]}{G_s} = 8,21 \cdot 10^{-8} \cdot \underset{[\text{K}]}{T} \cdot \underset{[\text{mmol/m}^2/\text{s}]}{g_s}$$

- La détermination du profil moyen de g_s au cours d'une journée est délicate et approximative. Car les valeurs sont maximales dès la première série de mesure et présentent une très forte dispersion :



Un polynôme de degré 4 intercepte les mesures avec une corrélation $r^2 = 0,59$ à partir de 7h00 (premières mesures). Pour la partie nocturne, g_s est posée quasi-nulle jusqu'à 5h00 puis raccordée par continuité à la valeur prise à 7h00 :



Extrapolation polynomiale du profil de conductance stomatique

Annexe 2

Détermination des surfaces conductrices

Pour déduire les flux de sève (l/h) des densités que l'on mesure (en l/h/dm²), il faut évaluer les surfaces conductrices. En présence de bois de cœur (xylème non conducteur), la surface conductrice est obtenue par l'expression :

$$S = \pi \cdot (R_{\text{int}}^2 - R_{\text{cœur}}^2)$$

avec : R_{int} , rayon intérieur de bois (hors écorce)
 $R_{\text{cœur}}$, rayon de bois de cœur

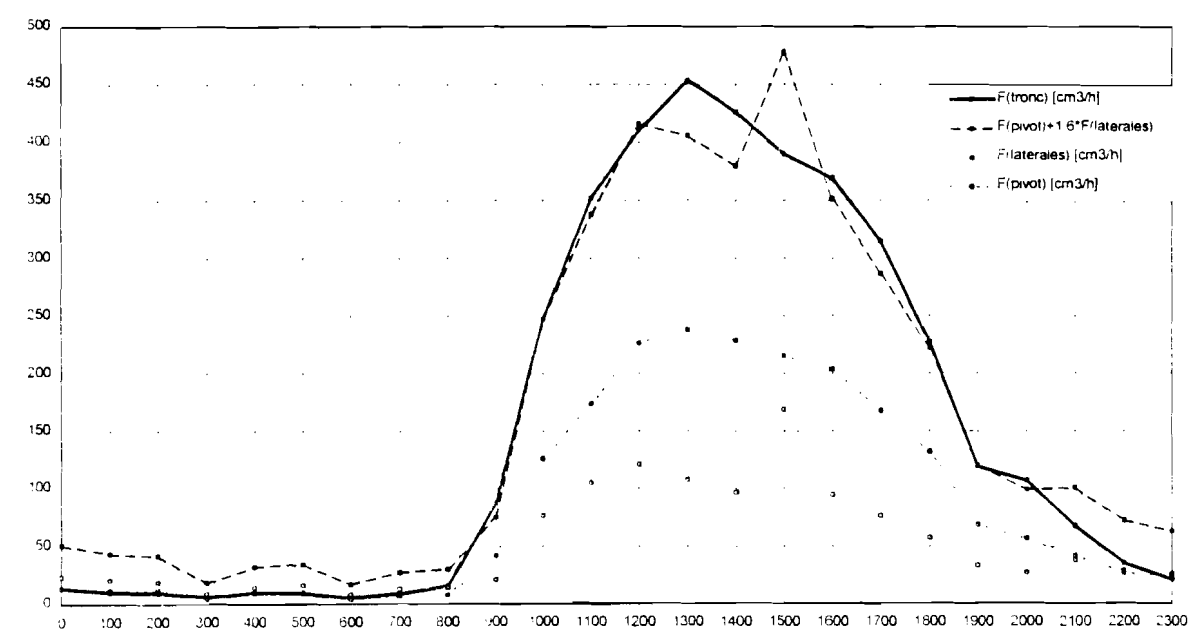
Ils sont obtenus par l'intermédiaire de corrélation avec le diamètre extérieur \varnothing_{ext} :

$$R_{\text{int}} = 0,49\varnothing_{\text{ext}} - 0,39 \quad [\text{cm}]$$

$$R_{\text{cœur}} = \text{Max} (0 ; 0,48 \varnothing_{\text{ext}} - 5,02) [\text{cm}]$$

N° Acacia	N° racine	diametre moyen [cm]	Rint [cm]	Rcœur [cm]	SA [cm ²]
36	1	4.45	1.79	0.00	10.04
	2	4.33	1.73	0.00	9.44
	3	6.50	2.79	0.00	24.51
	4	2.43	0.80	0.00	2.01
	5	4.32	1.72	0.00	9.35
	6	2.44	0.80	0.00	2.03
	7	2.24	0.71	0.00	1.58
	8	3.01	1.08	0.00	3.68
	9	5.05	2.09	0.00	13.66
laterales					76.30
pivot					115.93
tronc					150.20
37	1	7.12	3.10	0.00	30.14
	2	5.89	2.50	0.00	19.57
	3	3.05	1.10	0.00	3.84
	4	3.62	1.38	0.00	6.02
	5	2.28	0.73	0.00	1.66
	6	2.25	0.71	0.00	1.59
	7	0.89	0.04	0.00	0.01
	8	1.97	0.57	0.00	1.03
	9	8.37	3.71	0.00	43.24
	10	3.50	1.32	0.00	5.50
	11	3.21	1.18	0.00	4.40
	12	0.98	0.09	0.00	0.03
	13	1.12	0.16	0.00	0.08
laterales					117.09
pivot					222.76
tronc					175.18
39	1	7.73	3.40	0.00	36.23
	2	4.06	1.60	0.00	8.03
	3	3.54	1.34	0.00	5.68
	4	4.21	1.67	0.00	8.81
	5	1.34	0.27	0.00	0.23
	6	3.91	1.52	0.00	7.30
	7	2.89	1.03	0.00	3.30
laterales					69.58
pivot					193.84
tronc					193.84
Moyenne laterales					87.65
pivot					177.51
tronc					173.07

La comparaison des flux mesurés dans les troncs au cumul des flux mesurés dans les racines le 15/07/98 souligne un décalage attribué à une sous-estimation des flux racinaires. En effet, la densité moyenne de flux dans les racines latérales a été estimée à partir de mesures sur un échantillon de trois racines par rapport à un total de 29 racines. L'ajustement entre les flux conduit à affecter un coefficient multiplicateur de 1.6 à la densité de flux mesurée expérimentalement sur les racines latérales (ajustement de $S_{\text{Tronc}} \cdot J_{\text{Tronc}}$ à $S_{\text{pivot}} \cdot J_{\text{pivot}} + C_{\text{lat}} \cdot S_{\text{lat}} \cdot J_{\text{lat}}$ donne $C_{\text{lat}} = 1,6$ avec une corrélation $r^2 = 0,60$)



Profil des flux dans l'arbre (15/07/98)

Annexe 3

Simulation sur le logiciel VENSIM

1. Définition du modèle

- Paramètres d'entrée :
 - HR : profil de l'humidité relative [%]
 - T° : profil de température ambiante [°C]
 - g_{smmol} : profil de conductance stomatique [mmol/l/m²]
 - Surface : surface foliaire [m²]
 - P_{SP} : potentiel de l'eau dans le sol au niveau du pivot racinaire (-5 bar)
 - P_{SL} : potentiel de l'eau dans le sol en surface (-19 bar)
 - Résistances de conduction :

$R_T = 15$ bar.h/l	$R_P = 4$ bar.h/l	$R_L = 5$ bar.h/l
	$R_{SP} = 10$ bar.h/l	$R_{SL} = 12$ bar.h/l
	$\Psi_{SP} = -5$ bar	$\Psi_{SL} = -19$ bar
	$\Delta\Psi_{SP} = 14$ bar	$\Delta\Psi_{SP} = 0$ bar

- Paramètres intermédiaires :

$$R_{inf.} = (R_{pivot} + R_{sol/pivot}) / (R_{latérale} + R_{sol/latérale}) = 8 \text{ bar.h/l}$$

$$R'_{inf.} = R_{inf.} + R_T = 23 \text{ bar.h/l}$$

$$\Psi_{inf.} = R_{inf.} [(\Psi_{sol(nappe)} - \Delta\Psi_{sp}) / (R_{pivot} + R_{sol/pivot}) + (\Psi_{sol(surface)} - \Delta\Psi_{SL}) / (R_{latérale} + R_{sol/latérale})] = -19 \text{ bar}$$

- Variables d'état :

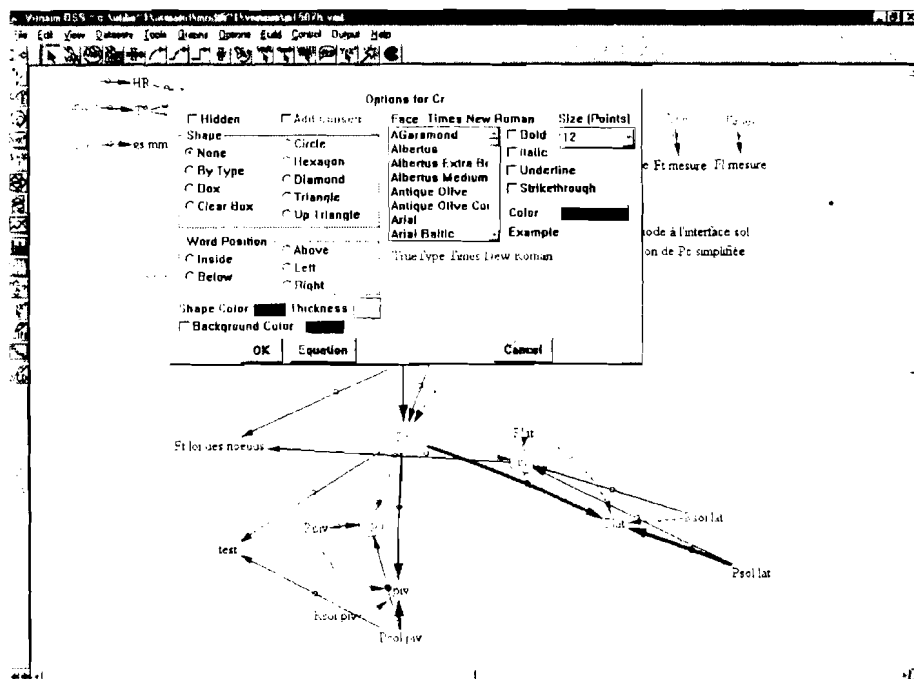
$$F_{Evap} = 2,84 * Surface * G_s * D_{sat}$$

$$G_s = g_{smmol} * 273 / (T^{\circ} + 273) / 44600$$

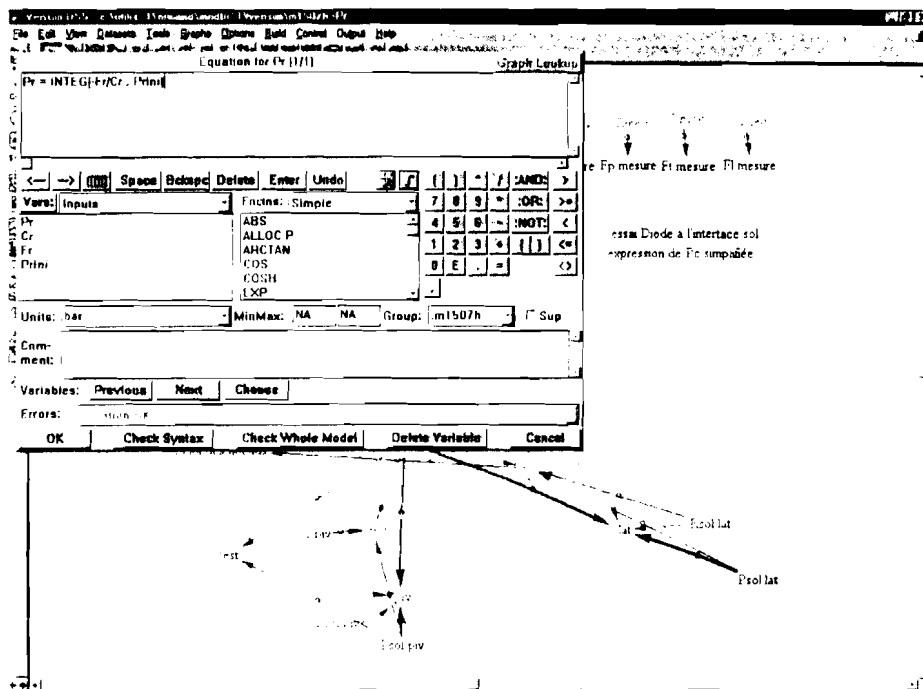
$$D_{sat} = 2,1718 \cdot 10^3 * [1 - HR/100] * \exp[-4157 / (T^{\circ} + 239,24)]$$

2. Prise en main du logiciel

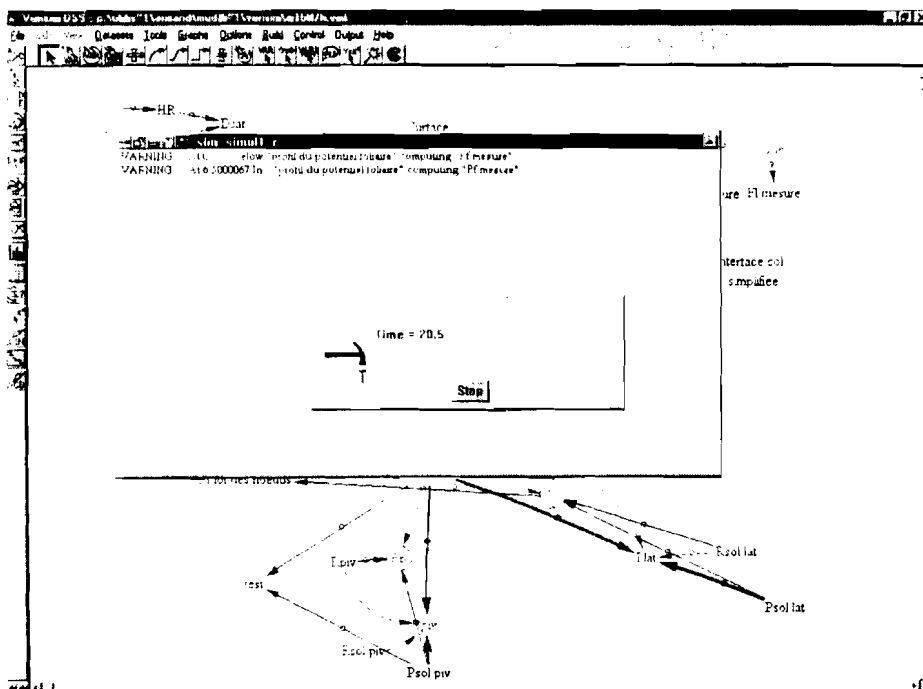
- Ouverture du fichier : **File → Open Model**
 File Name : c:\utilis~1\Armand\modéli~1\Vensim\m1507g.vmf
- modification d'un paramètre : pointer la souris sur le paramètre à changer, cliquer sur le bouton droit :



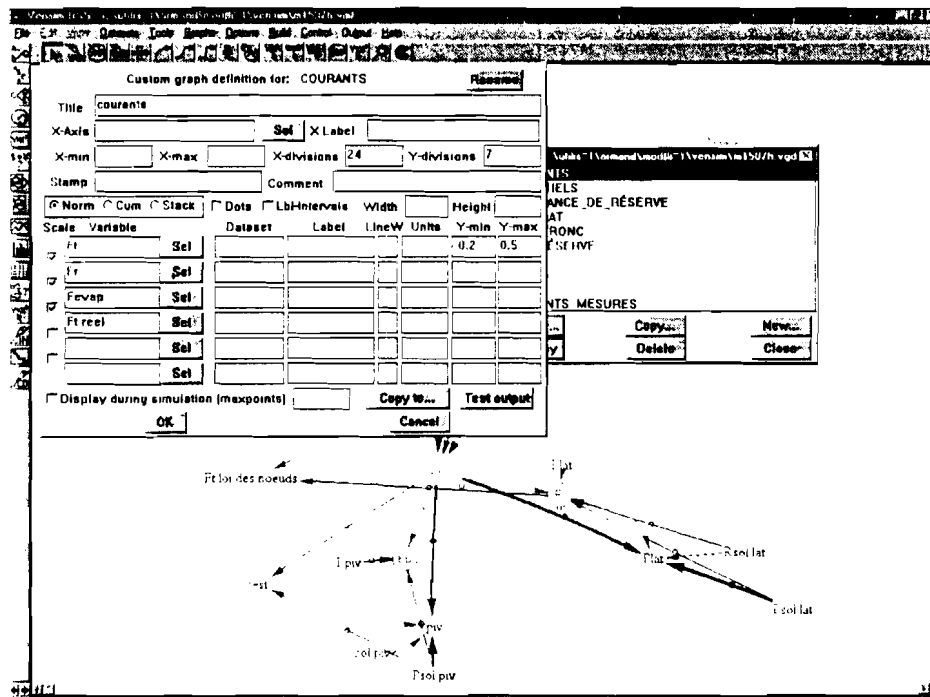
A partir de cette boîte de dialogue, on peut modifier l'affichage du paramètre sélectionné (couleur, encadrement, police,...). En cliquant sur **Equation**, on a accès à la définition du paramètre (loi de variation, unités,...) :



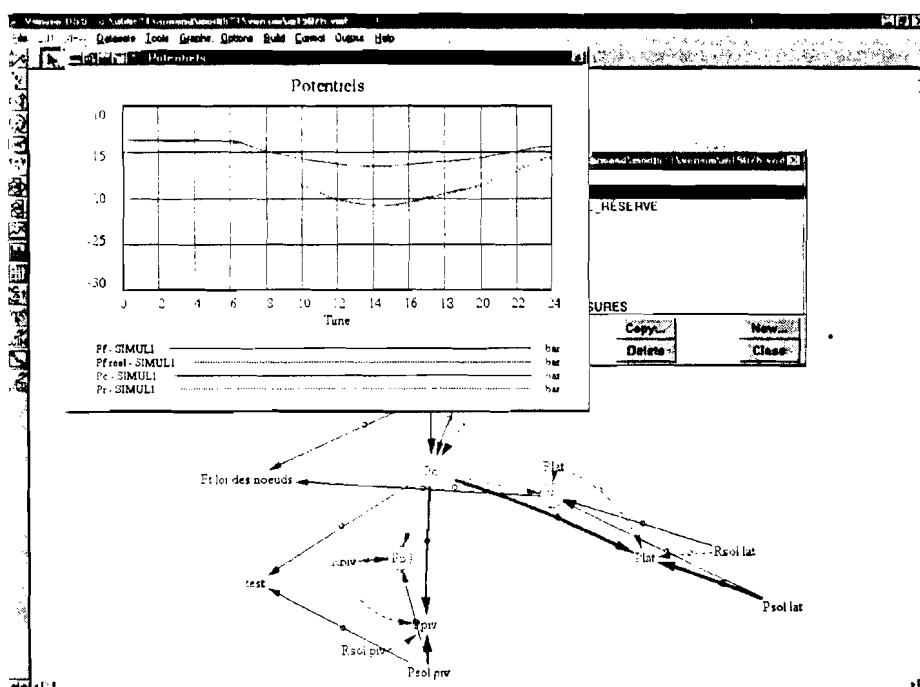
- lancement d'une simulation : dans le menu principal **Dataset** → **Simulate Model**. Après avoir confirmé le nom du fichier de simulation (*.vdf), le calcul se lance automatiquement :



- Visualisation des résultats : dans le menu principal **G**raphs → **C**ontrol... → **N**ew... puis sélectionner les variables désirées. Le jeu de graphiques ainsi défini est sauvegardé avec l'extension *.vgd.



Une fois le graphique défini, le visualiser par **Graphs** → **Control...** → **Display** :



BIBLIOGRAPHIE

- A.J. BRENNER, P.G. JARVIS & R.J. VANDENBELDT, 1991.** Transpiration from a neem windbreak in the Sahel. In : Soil water balance in the Sudano-Sahelian Zone (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). IAHS Publ. n° 199, pp. 375-385.
- D.K. Mc DERMITT, 1990.** Source of error in the estimation of stomatal conductance and transpiration from porometer data. *HortScience*, Vol.25(12) : 1538-1548.
- F. DO, A. ROCHETEAU, 1999.** Caractérisation du cycle annuel de transpiration d'*Acacia tortilis* par la mesure des flux de sève brute. In « *Acacia tortilis* (Forsk.) Hayne ssp. *raddiana* (Savi) : Synthèse des recherches de l'ORSTOM » M. Grouzis & E. Le Floch éditeurs scientifiques, 23 p.(à paraître)
- F. DO, A. ROCHETEAU, A.L. DIAGNE, M. GROUZIS, 1998.** Flux de sève et consommation en eau d'*Acacia tortilis* dans le Nord Ferlo. In « L'Acacia au Sénégal », C. NEF-CAMPA, S. HAMON et C. GRIGNON éditeurs scientifiques, Collection « Colloques & Séminaires », ORSTOM Editions, Paris, pp. 63-80.
- P.G. JARVIS & K.G. MAC NAUGHTON, 1986.** Stomatal control of transpiration : scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*, 15, 1-49.
- N. KATERJI, M. HALLAIRE, R. DURAND, 1984.** Transferts hydriques dans le végétal – III. Simulation de l'influence des paramètres du couvert sur l'évolution diurne du potentiel hydrique foliaire. *Acta Oecologica, Oecol. Plant.* Vol. 15 (19), n° 2, 107-117.
- N. KATERJI, M. HALLAIRE, 1984.** Les grandeurs de référence utilisables dans l'étude de l'alimentation en eau des cultures. *Agronomie* 4 (10), 999-1008
- R.W. PEARCY, E.D. SCHULZE & R. ZIMMERMANN, 1989.** Measurement of transpiration and leaf conductance. *Plant physiological Ecology*, Chapman & Hall ed., pp 137-159
- F. TARDIEU, T. AMEGLIO, N. BREDAS, S. DAYAU, 199X.** Régulation des transferts hydriques chez les plantes soumises à la sécheresse. In « Actes de l'Ecole chercheurs INRA en Bioclimatologie – Tome 1 : De la plante au couvert végétal », INRA edition ; pp. 61-82.
- VENSIM, 1994.** Ventana Simulation Environment - Reference Manual Version 1.61. Ventana Systems, Inc., Belmont USA, 373 p..